

0-789583

На правах рукописи

САФАРГАЛЕЕВ Владимир Ваисович

**ВОЗМУЩЕНИЯ МАГНИТОСФЕРНО-ИОНОСФЕРНОЙ
СИСТЕМЫ В АРКТИЧЕСКИХ ШИРОТАХ И ЗАДАЧИ
МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ**

*Специальность 25.00.29 – физика атмосферы
и гидросферы*

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук



Апатиты
2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Полярном геофизическом институте Кольского научного центра РАН
(ПГИ КНЦ РАН)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Левитин Анатолий Ефимович

доктор физико-математических наук
Трошичев Олег Александрович

доктор физико-математических наук
Пилипенко Вячеслав Анатольевич

Ведущая организация Учреждение Российской академии наук
Институт солнечно-земной физики
Сибирского отделения РАН

Защита диссертации состоится «25» октября 2011 г. в 14 часов
30 минут на заседании диссертационного совета Д 002.237.01 при
Учреждении Российской академии наук Институте земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн РАН им. Н.В. Пушкова по адресу:
142190, Московская обл., г. Троицк, ИЗМИРАН (проезд автобусом № 398 от
станции метро «Теплый стан» до остановки «ИЗМИРАН»)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЗМИРАН

Автореферат разослан «28» августа 2011 г.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000687187

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.002.237.01
доктор физико-математических наук,
профессор

Михайлов Ю.М.

I. Общая характеристика работы

Диссертация в целом посвящена исследованиям возмущений в околоземном космическом пространстве, в генерации и эволюции которых главную роль играют неоднородность плазмы и кривизна пронизывающих ее магнитных силовых линий. В первую очередь речь идет о крупномасштабных возмущениях, связанных с перемещением больших объемов плазмы. Рассматриваются также волновые процессы в диапазоне частот 0.1-5 Гц. С одной стороны, практически любое возмущение в магнитосфере, включая и те, которые рассматриваются в диссертационной работе, вызвано или контролируется изменением параметров межпланетной среды через так называемые солнечно-земные связи. С другой стороны, благодаря магнитосферно-ионосферному взаимодействию, магнитосферные процессы «отражаются» в ионосфере, давая тем самым возможность провести их исследование с помощью аппаратуры, установленной на поверхности Земли. В контексте вышесказанного, задача такого исследования состоит в том, чтобы из всего многообразия наблюдаемых ионосферных явлений выбрать именно те, которые представляют «ионосферный след» возмущений неоднородной плазмы в криволинейном магнитном поле, и исследовать их связь с возмущениями в межпланетной среде (солнечном ветре).

Для корректного отбора ионосферных явлений следует определить характерные черты рассматриваемого класса магнитосферных возмущений. Это было целью теоретических исследований, составляющих часть диссертационной работы. Агентами, которые наиболее удачно с экспериментальной точки зрения визуализируют магнитосферно-ионосферное взаимодействие, являются заряженные частицы и волны альвеновского типа. Оба этих агента распространяются вдоль силовых линий, обеспечивая тем самым перенос информации из возмущенной области магнитосферы в сопряженный с ней участок ионосферы. Эффект от выпадающих частиц может быть изучен при помощи оптической аппаратуры (полярные сияния), радаров и риометров. Альвеновские волны регистрируются на поверхности земли магнитометрической аппаратурой (геомагнитные пульсации). Целью экспериментальных исследований, составляющих другую часть диссертации, был детальный анализ динамических процессов в полярных сияниях и риометрическом поглощении, а также морфологических особенностей пульсации диапазонов Pc1 и Pc5, обусловленных изменением состояния магнитосферной плазмы и межпланетной среды. Анализ проводился в свете теоретических выводов относительно особенностей формы и динамики рассматриваемого класса магнитосферных возмущений. Основу экспериментальных исследований составил богатейший материал, полученный в обсерваториях института на Кольском полуострове и арх. Шпицберген.

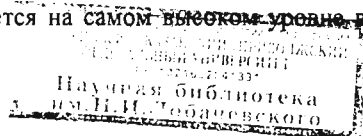
Актуальность работы. Расширение сферы деятельности человека в околоземное космическое пространство делает все более необходимым знание характера и причин происходящих здесь физических процессов – возмущений магнитного поля Земли, вариаций потоков заряженных частиц, формирование ионосферных неоднородностей и т.п., а также умение их прогнозировать. Поэтому исследование влияния солнечной активности на процессы в магнитосферно-ионосферной системе, а также механизмов, посредством которых это влияние осуществляется, стали сейчас весьма актуальными и дали толчок развитию отдельной прикладной отрасли науки – «Космическая погода».

Физические процессы в магнитосфере Земли весьма разнообразны. Чтобы составить четкое представление об этих процессах, не говоря уже о том, чтобы их прогнозировать, требуется проведение достаточно частых как во времени, так и в пространстве измерений параметров плазмы и полей. Прямые (спутниковые) измерения дают локальные значения параметров, и при их использовании возникают проблемы отделения временных вариаций от пространственных. Идеальным было бы такое положение, когда большое число спутников в течение длительного времени проводили бы измерения в основных структурных образованиях магнитосферы. Реализацией такого положения можно считать спутниковые проекты CLUSTER и THEMIS.

Однако и этими проектами проблема не снимается, поскольку, двигаясь по орбитам, спутники проходят интересующую нас область за несколько минут, затем уходят из нее и возвращаются через несколько часов или даже дней. Редки ситуации, когда спутник оказывается в нужном месте и в нужное время. В отличие от спутников, наземные данные позволяют проследить развитие явления за более длительный промежуток времени, включая его предысторию, что особенно важно для прогностических целей. Нельзя сбрасывать со счетов и дороговизну многоспутниковых проектов. Поэтому, несмотря на обилие спутниковых измерений, анализ данных наземных наблюдений продолжает оставаться более выгодным с точки зрения баланса между стоимостью и эффективностью способом экспериментального решения задач космической погоды.

Ионосфера арктических широт играет особую роль в исследованиях космической погоды. В ночные часы она сопряжена с областями магнитосферы, где находится источник большинства магнитосферных возмущений (плазменный слой). В дневные часы в ионосферу высоких широт «проектируются» процессы на магнитопаузе и прилежащих доменах, отражающие взаимодействие магнитосферы с межпланетной средой.

Актуальность исследований космической погоды в арктических широтах подтверждается на самом высоком уровне в форме финансирования



правительством РФ работ по созданию российского геофизического полигона на арх. Шпицберген

Цели и задачи работы. Целью работы является экспериментальное исследование характеристик возмущений в магнитосферно-ионосферной системе арктических широт в виде пространственно-периодических структур в полярных сияниях и некоторых типов волновой активности в герцовом диапазоне, являющихся продуктом взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли. На основе этих характеристик, а также с привлечением результатов теоретических исследований построить физические модели (сценарии), описывающие их генерацию и эволюцию. В связи с этим, выделяются следующие основные задачи:

1. Посредством высокоскоростных (телевизионных) методов регистрации полярных сияний, а также тех новых возможностей, которые предоставляют компьютерные методы обработки телевизионных изображений, исследовать структурные и динамические особенности пульсирующих и диффузных сияний.

2. На основе координированных оптических и радарных измерений исследовать характерные черты динамики пространственно-периодических структур полярных сияний (мультиплетные дискретные дуги, омега-сияния и сияния типа «факелов») на ранней стадии их зарождения.

3. Исследовать морфологические характеристики пульсаций в герцовом диапазоне, представляющих отклик магнитосферы на внезапное изменение динамического давления солнечного ветра (SI). Исследовать их связь с протонными высыпаниями (по данным спутников серии DMSP).

4. На основе данных индукционных магнитометров на Шпицбергене и на материке (северная Скандинавия и Кольский полуостров) выделить класс пульсаций диапазона Pc1, локализованных в полярной шапке. Установить связь этих пульсаций с ионосферной конвекцией и вариациями ММП.

5. Исследовать запаздывание пульсаций герцового диапазона, инициированных внезапным изменением динамического давления солнечного ветра (SI) на разных станциях, а также их запаздывание относительно начала стимулированных SI электронных высыпаний и геомагнитных возмущений типа «предварительный импульс».

Практическая цель исследований – продемонстрировать на практике возможности регулярных наблюдений в арктических широтах для глобального мониторинга возмущений околоземного космического пространства (космической погоды).

Научная новизна работы. Топология околоземного космического пространства такова, что исследуемые магнитосферные возмущения «проектируются» силовыми линиями либо в область арктической ионосферы,

называемую авроральной зоной, либо в область дневного каспа. Полярный геофизический институт имеет многолетний опыт работы именно в этих широтах. В первую очередь, это опыт проведения оптических наблюдений и их анализа. В понимании природы полярных сияний много сделано сотрудниками ПГИ В.Г. Воробьевым, Т.А. Корниловой, И.А. Корниловым, В.Р. Тагировым, В.Л. Зверевым, С.А. Черноусом, В.К. Ролдугиным. Пионерские работы, давшие толчок этому направлению высокоширотных исследований, были выполнены Г.В. Старковым, Я.И. Фельдштейном, М.И. Пудовкиным, Л.С. Евлашиным, О.А. Трошичевым.

Современные знания о природе этого зрелищного явления основаны на данных регулярных наблюдений в авроральной зоне – узком кольце, окружающем магнитный полюс в интервале широт 65-70° MLAT. Наблюдения проводились на сети цифровых камер всего неба в Скандинавии и Канаде и цепочке фотокамер вдоль северного побережья бывшего СССР. Главный недостаток получаемых данных – низкое временное разрешение (1 минута для фотографического способа регистрации сияний и 20 секунд для цифрового), что не позволяет увидеть детали динамического процесса. Несмотря на это, предыдущие исследования позволили выявить основные морфологические особенности сияний. Например, характер распределения дуг вдоль меридиана и широты привел к концепции «аврорального овала» (Feldstein and Starkov, 1967). Еще одна особенность дуг – малые поперечные размеры – рассматривается как основное требование к теории, описывающей механизм формирования дуги (Bogovsky, 1993). Изучение динамики дуг в контексте суббуревой активности показало, что видимым признаком взрывной фазы суббури является стремительное движение дуг к полюсу (Snyder and Akasofu, 1972) и с физической точки зрения может быть обусловлено пересоединением в плазменном слое магнитосферного хвоста. Обнаружена тесная связь омега-сияний с вариациями азимутальной компоненты геомагнитного поля (André and Baumjohann, 1982) и фазой восстановления суббури (Orgenoorth *et al.*, 1994). Пионерские исследования ПГИ на арх. Шпицберген и о. Хейс выделили отчетливую статистическую связь динамики аврорального овала с вариациями B_z компоненты ММП и дневное авроральное явление, известное ныне как *poleward moving auroral forms* (Vorobjev *et al.*, 1976).

В 1980-х гг. в ПГИ состоялся перевод оптических наблюдений на телевизионную технику, что расширило рамки исследований включением, например, таких «быстрых» авроральных явлений, как пульсирующие сияния. Однако новое слово удалось сказать после того, как внедрение в научные исследования компьютерных технологий позволило переводить телевизионные записи в цифровой формат с последующей обработкой данных на компьютере. Используя эту возможность, автор диссертации впервые применил в практике

отечественных исследований предварительный анализ оптических данных по кеограммам, построенным по оцифрованным телевизионным записям (Safargaleev *et al.*, 1996, 1997). В отличие от использовавшихся до этого пространственно-временных диаграмм, строившихся вручную по набору отдельных фотокадров (фоторегистрация) или стоп-кадров (телевизионная регистрация) и отражавших лишь характер движения авроральных форм, кеограммы позволяют видеть временные изменения интенсивности свечения как в самой структуре, так и в фоне. Именно благодаря этому методу автору удалось обнаружить в пульсирующем и диффузном фоне более яркие пространственно-периодические структуры и оценить скорость их распространения, которая оказалась настолько медленной, что без представления авроральной динамики в виде кеограмм факт движения был незаметен. Помимо этого, возможность суммировать большое количество кадров, представляющих по сути цифровые матрицы, позволила «увидеть» форму и оценить размеры этих структур, практически неразличимых ни на мгновенном снимке, ни на телевизионной записи (Сафаргалеев и др., 2000; Сафаргалеев и Осипенко, 2001).

Анализ кеограмм позволил также выявить подкласс авроральных дуг, теория генерации которых должна, прежде всего, объяснить их движение по направлению своей вытянутости (далее для краткости «вдоль себя») в процессе возникновения (Safargaleev *et al.*, 2003; Kozlovsky *et al.*, 2003; Сафаргалеев и др., 2009). Кроме того, было экспериментально подтверждено теоретическое утверждение о том, что изменения светимости авроральной дуги сопровождаются изменением электрического поля в ее окрестности (Сафаргалеев и др., 2000; Safargaleev *et al.*, 2000). Впоследствии этот факт лег в основу экспериментального подтверждения механизма генерации магнитных возмущений во время резких скачков давления солнечного ветра (Safargaleev *et al.*, 2010) и гипотезы о тригировании суббурь электрическим импульсом из ионосферы (Сафаргалеев и др., 2000).

Экспериментальные исследования геомагнитных пульсаций в герцовом диапазоне интенсивно проводились и проводятся в ИФЗ РАН. Результаты исследований тесно связаны с именами сотрудников этого института В.А. Троицкой, Э.Т. Матвеевой, Н.Г. Клейменовой, Б.В. Довбни, В.А. Пархомова. Теория пульсаций этого диапазона развита в работах А.В. Гульельми, Ф.З. Фейгина, В.Ю. Трахтенгерца, А.Г. Демехова. Наблюдения вариаций геомагнитного поля проводились в средних широтах (обс. Борок), где положение источника пульсаций может быть связано с плазмапаузой или кольцевым током. Наиболее изученными были пульсации типа «жемчужин» и колебания убывающего периода (КУПы или IPDP).

Активные исследования в высоких широтах начались с введением в строй финской цепочки индукционных магнитометров Нурмиярви–Килписярви. Объектами исследований стали так называемые спектрально-резонансные структуры в шумовом фоне, считающиеся проявлением ионосферного альвеновского резонатора (Belyaev, 1999), и пульсации PiB, связанные с активностью дуг сияний. Результаты по «жемчужинам» и КУПам дополнились привлечением этого вида пульсаций к объяснению локализованных протонных высыпаний на низкоорбитальных спутниках NOAA (Yahnina et al., 2003).

Спустя примерно четыре года аналогичные наблюдения начались и в России – в обсерваториях ПГИ на Кольском полуострове (п. Ловозеро) и арх. Шпицберген (п. Баренцбург). При этом частотный диапазон наблюдений заметно превышал таковой для аппаратуры, установленной в обс. Борок. Цифровой способ регистрации пульсаций и точная привязка измерений по времени – еще одно преимущество магнитных станций ПГИ. Благодаря этим нововведениям, автору представляемой диссертационной работы удалось восполнить существующий пробел в морфологии подкласса пульсаций Pc1, которые возбуждаются скачком динамического давления солнечного ветра. Результат исследования *Bursts of ULF noise excited by sudden changes of solar wind dynamic pressure* был включен в список важнейших результатов РАН за 2000 г. Технические характеристики индукционных магнитометров ПГИ, с одной стороны, и резкое начало пульсаций этого подкласса, с другой стороны, позволяют с высокой точностью определять момент начала пульсаций, чего нельзя сказать, например, про «жемчужины» и IPDP. Опираясь на эту и другие особенности, автор впервые продемонстрировал на практике возможность использования пульсаций, возбуждаемых ударом по магнитопаузе, в качестве диагностического инструмента магнитосферной плазмы (Сафаргалеев и др., 2002а,б; Сафаргалеев и др., 2004; Safargaleev et al., 2002; Safargaleev et al., 2010).

Кратко суммируем вышесказанное. Новизна представляемой работы в целом обусловлена новизной сочетания объектов исследования, методов регистрации, анализа, а также места проведения наблюдений. Примерами таких сочетаний являются:

- регулярные наблюдения пульсаций в герцовом диапазоне в области каспа на арх. Шпицберген, дополненные аналогичными магнитными измерениями на материке и радарными данными. Ранее наблюдения в такой комбинации не анализировались. Новый результат – установление связи некоторых типов пульсаций Pc1 с пересоединением;
- наблюдения пульсаций в герцовом диапазоне, вызванных внезапным сжатием магнитосферы, и протонных высыпания в авроральной зоне (по

данным спутников DMSP). Ранее наблюдения в такой комбинации не анализировались. Новый результат – показано, в чем именно заключается интуитивно постулируемая подготовленность магнитосферы к отклику на резкое усиление давления солнечного ветра (внезапный импульс, SI). Это наличие в дневной магнитосфере узкого слоя из горячих протонов;

- применение в качестве диагностического инструмента геомагнитных пульсаций герцового диапазона, возбуждаемых внезапными импульсами. Ранее для этих целей предлагалось использовать пульсации Pc1 типа «жемчужин». Новый результат – оценена скорость распространения альвеновских волн вдоль силовых линий в магнитосфере и в ионосферном волноводе;

- высокоскоростной аналоговый (телевизионный) способ регистрации полярных сияний в сочетании с цифровыми методами обработки позволил увидеть детали авроральной активности, не различимые ранее невооруженным глазом из-за их пространственно-временных масштабов;

- несколько совместных специализированных кампаний по регистрации полярных сияний в сочетании с измерениями ионосферной конвекции вдоль авроральных дуг. Традиционно для исследования сияний используют стандартные режимы работы радаров EISCAT, когда измерения проводятся вдоль меридиана (то есть перпендикулярно дугам). Новый результат – привлечение желобковой неустойчивости магнитосферной плазмы в качестве вероятного механизма формирования вытягивающихся вдоль себя авроральных форм;

- совместный анализ магнитных возмущений и изменений уровня поглощений космического радишума, происходящих в ответ на внезапный импульс. Ранее наблюдения в такой комбинации применительно к SI не анализировались. Новый результат – источником так называемого предварительного импульса SI может быть локальное изменение ионосферной проводимости, вызванное усилением потока выпадающих частиц.

Научная и практическая ценность работы. В работе рассмотрен тип МГД-волн, характеризуемый необычайно медленной скоростью распространения в направлении поперек магнитного поля. С привлечением этих волн удалось объяснить некоторые медленные процессы в полярных сияниях с пространственно-периодической структурой и большой период модуляции волновой активности в герцовом диапазоне, инициируемой внезапным усилением динамического давления солнечного ветра.

Предложен экспериментальный способ оценки времени распространения альвеновских волн из магнитосферы в ионосферу, основанный на разнице скоростей заряженных частиц и альвеновских волн.

Показана применимость дневных геомагнитных пульсаций диапазона Pc1 для исследования процессов на магнитопаузе.

В целом, понимание способов реализации солнечно-земных связей способствует разработке научных основ прогноза возмущений в околоземном космическом пространстве. Практическая ценность прогноза геомагнитных возмущений очевидна при оценке влияния «паразитных» наводок на состояние трубопроводов (Shapka, 1992) и линий электропередач (Pulkkinen *et al.*, 2005). Возможность прогноза авроральных высыпаний может заинтересовать специалистов, занятых радиационной безопасностью спутников. Практическую ценность могут иметь прогнозы авроральной активности, которая рассматривается сегодня как один из источников погрешности позиционирования различных объектов с помощью навигационных систем типа GPS и ГЛОНАСС. Практическую ценность представляет также сделанный в работе акцент на эффективность наземных видов наблюдений, внимание к которым за последние годы заметно ослабло за счет интенсификации спутниковых программ.

Степень достоверности. Степень обоснованности заключений, сделанных по анализу экспериментальных данных, определяется использованием стандартизированной аппаратуры, большого массива данных, оценки погрешностей, а также повторяемостью результатов по данным разных станций. Обоснованность теоретических заключений подтверждается полученными из эксперимента статистическими и морфологическими характеристиками явлений.

Положения, выносимые на защиту

1. Сценарий эволюции пространственно-периодических авроральных структур как результат отображения возмущений желобкового типа из области магнитосферы с плавным градиентом плазменного давления в сопряженную ионосферу. Рассмотрены:

- пространственно-временные характеристики не исследованной ранее формы авроральной активности в виде череды полос повышенной интенсивности, медленно распространяющихся через область пульсирующего или диффузного свечения, механизм генерации, методика диагностики, возможная связь с проблемой триггирования суббури;

- особенности динамики не типичных для дневных часов пространственно-периодических авроральных структур в виде омега-сияний и авроральных факелов в контексте ионосферной конвекции, влияние межпланетной среды на условия генерации омега-сияний, механизм трансформации омега-сияний в авроральные факелы;

- особенности динамики мультипетлевых дуг на стадии их зарождения, исследованные в контексте ионосферной конвекции, механизм их формирования.

2. Пульсации диапазона Pc1, возбуждаемые ударом по магнитопаузе фронта неоднородности солнечного ветра, как новый инструмент диагностики околосолнечной плазмы, позволяющий делать выводы относительно:

- существования в дневной части магнитосферы протонов с энергиями десятки кэВ;

- возбуждения в магнитосфере резонансных колебаний компрессионного типа с периодом 10-15 минут, невидимых в данных наземных магнитометров;

- времени распространения альвеновской волны из магнитосферы в ионосферу и, как следствие, величины средней скорости распространения пульсаций вдоль силовых линий геомагнитного поля и периода собственных альвеновских колебаний силовой трубки, в которой находится источник пульсаций Pc1;

- скорости распространения волн герцового диапазона в ионосферном волноводе;

- момента подхода фронта неоднородности солнечного ветра к магнитопаузе.

3. Дневные высокоширотные пульсации диапазона Pc1 как новый инструмент для исследования процессов взаимодействия солнечного ветра с дневной магнитопаузой наземной аппаратурой.

4. Механизм генерации предварительного импульса SI за счет локального изменения ионосферной проводимости высыпавшимися частицами.

Личный вклад автора. Постановка задач, разработка методов решений, обработка данных и получение результатов выполнены автором или под его руководством. В частности, ряд представленных результатов был получен в ходе специализированных международных кампаний на арх. Шпицберген, в формировании научных программ которых автор принимал непосредственное участие. Основные статьи, опубликованные по теме диссертации, написаны при определяющем вкладе автора диссертации.

II. Содержание диссертации

Диссертация состоит из 7 разделов, включая введение и заключение, содержит 326 страниц текста и 105 рисунков. Список литературы включает 287 наименований. Во **введении** (раздел 1) сформулированы цели работы, ее актуальность, научная и практическая ценность полученных результатов, а также их новизна. В краткой формулировке приводятся положения, выносимые на защиту, и содержание основных разделов диссертации.

В **разделе 2** дается характеристика объектов исследования, описываются методы исследования, используемая аппаратура и методы

обработки данных. Собственно результаты исследований представлены в последующих четырех разделах. При этом в каждом разделе есть подразделы, где формулируется проблема, дается обзор литературы, перечисляются результаты исследований.

В **разделе 3** описывается роль возмущений желобкового типа в задачах космической погоды. Интерес именно к этому виду плазменных неустойчивостей обусловлен, прежде всего, тем, что это (1) самый «нестабилизируемый» тип неустойчивости с точки зрения магнитного удержания плазмы и (2) он связан с макроскопическим перемещением больших участков плазмы как целого. Крупномасштабные движения в околоземном космическом пространстве плазмы как таковые являются одним из элементов космической погоды. Кроме того, ряд исследователей предлагают желобковую неустойчивость в качестве причины развития магнитосферной суббури – одного из наиболее ярких катаклизмов космической погоды. В других работах желобковая неустойчивость рассматривается как элемент взаимодействия солнечного ветра с дневной магнитопаузой, что также имеет отношение к формированию космической погоды. Приводятся обзорные сведения с акцентом на физике неустойчивости и на те особенности ее развития, которые будут приниматься во внимание в дальнейшем при решении задач наземного мониторинга магнитосферных процессов. В подразделе 3.3 получено и проанализировано дисперсионное соотношение для МГД-волн в среде с плавным градиентом плазменного давления и искривленным магнитным полем («внутренние гравитационные» волны). Основные особенности таких волн – способность рассеять авроральные электроны в конус потерь, необычно медленная скорость распространения поперек геомагнитного поля и возможность отражаться, не доходя до ионосферы (при распространении вдоль геомагнитного поля).

В начале **раздела 4** обобщаются основные признаки магнитосферных возмущений желобкового типа (классическая и модифицированная перестановочные неустойчивости и «внутренние гравитационные» волны) и формулируются их ионосферные проявления – особенности авроральной активности и характер ионосферной конвекции. С опорой на эту информацию в подразделе 4.2 проводится детальный анализ необычного для дневных часов случая возникновения авроральной структуры типа факела. Структура наблюдалась во время первой международной наблюдательной кампании на Шпицбергене по исследованию динамики сияний в контексте ионосферной конвекции, одним из идейных организаторов которой был автор представляемой диссертации. При анализе обращается внимание не только на характер динамики сияний (движение к полюсу) и характер конвекции (противоположного направления снаружи и внутри факела, как это показано на

рис.1а), но и на предысторию явления. Делается вывод о том, что факел есть результат вытягивания к полюсу одной из «перегородок» «предсуществующих» Ω -сияний вследствие развития классической желобковой неустойчивости. Появлению неустойчивой границы в дневной магнитосфере способствовали изменения в межпланетной среде, а дестабилизировать Ω -сияния могло «отключение» проводящей ионосферы областью аномального сопротивления, вызвавшей ускорение частиц, формирующих небольшую дискретную структуру к полюсу от Ω -сияний (рис.1б). Факт ускорения выявлен посредством триангуляционных измерений высоты этой дуги в момент ее интенсификации камерами в Баренцбурге и Нью Алезуне. Отмечается, что развитие факела схематически напоминает развитие суббури с псевдодобрейкапом и формированием авроральной выпуклости.

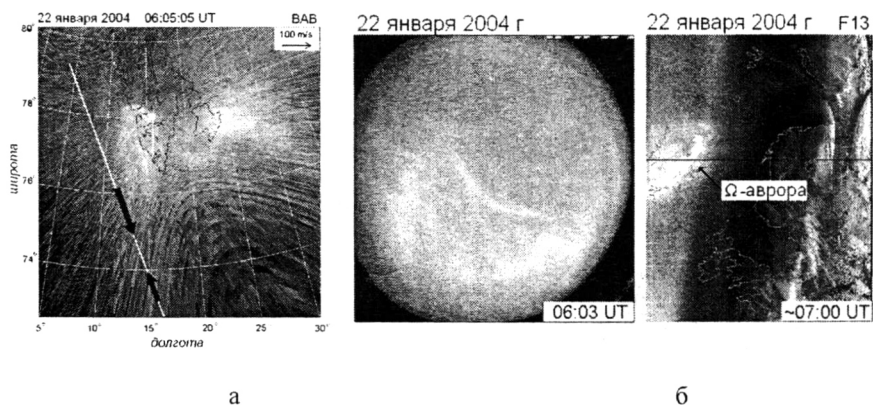


Рис.1. Радарные измерения вне и внутри факела (а); дискретная форма к полюсу от Ω -сияний (б)

В подразделе 4.3, также в контексте ионосферной конвекции исследуется процесс зарождения высокоширотных авроральных дуг на ночной стороне. Вопрос важен для понимания механизма генерации дуги, поскольку теория, как правило, опирается на типичные характеристики уже существующих дуг. Применение телевизионной техники позволило выделить класс дуг, которые появляются в поле зрения ТВ-камеры не сразу, а постепенно, «вползая» с западного или восточного горизонта (рис.2). При этом они располагаются на полюсной границе овала под небольшим углом к L-оболочке.

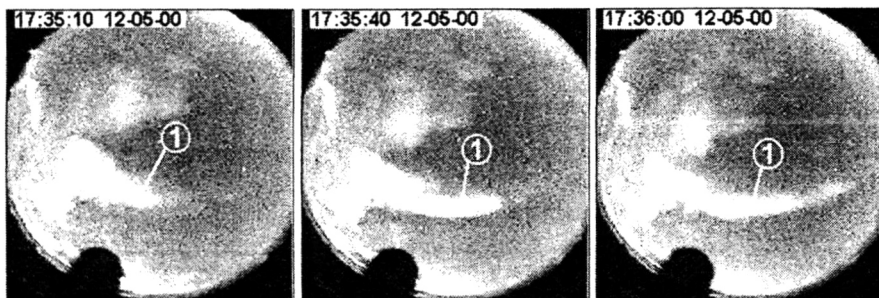


Рис. 2. Распространение авральной дуги из активной области с востока на запад

Место, откуда они появляются, характеризуется повышенной авральной активностью типа суббуревой (рис.3а). Характер конвекции такой же, как и в случае формирования факела: внутри светящейся области плазма течет вдоль широты в направлении распространения свечение, а вне этой области – в противоположном. Ориентация дуг и характер конвекции позволяет связать их с развитием модифицированной желобковой неустойчивости. Условия для ее развития – непараллельность контуров $B=const$ и $p=const$ – создаются за счет суббуревой деформации ночной магнитосферы (рис.3б).

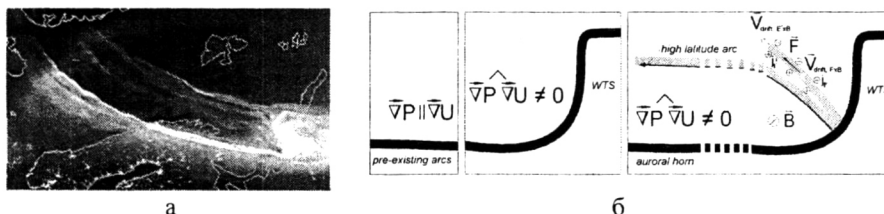


Рис.3. Высокоширотные дуги в данных DMSP (а); схема формирования дуг в ходе развития модифицированной желобковой неустойчивости (б)

В подразделе 4.4 с развитием модифицированной желобковой неустойчивости связывается механизм генерации дуг, получивших в литературе название «коррелирующих». В этих дугах электрическое поле повышено, хотя из физических соображений в области увеличения ионосферной проводимости (какую, по сути, представляет дуга) электрическое поле должно ослабевать. Существование таких дуг подвергалось сомнениям из-за невысокой точности оптических измерений. В рассматриваемом случае сияния регистрировались мультикамерной системой ALIS на севере Швеции.

Кроме того, что данные имели хорошее пространственное и временное разрешение, использование нескольких камер позволило определить высоту сияний и тем самым провести корректное сопоставление оптических и радарных измерений. За время работы радара EISCAT в режиме «три-статик», удалось рассчитать электрическое поле в окрестности двух дуг – рождающейся и уже существующей. Если поле внутри последней вело себя «традиционным» образом, то есть ослабевало, то внутри рождающейся дуги поле коррелировало с проводимостью, также измеренной при помощи радара. Поскольку «рождение» дуги происходило по описанной выше схеме, то есть дуга вытягивалась вдоль себя из области интенсивного свечения, увеличение поля внутри ее логично объясняется сложением поля стационарной конвекции с полем поляризации, «разгоняющим» плазменный желоб в процессе развития модифицированной желобковой неустойчивости.

В подразделе 4.5 детально анализируется практически не исследованная форма авроральной активности в виде системы из нескольких полос с интенсивностью свечения, ненамного превышающей интенсивность фонового диффузного или пульсирующего сияния. Полосы видны только в светящемся фоне и пропадают, достигая границы, занятой свечением области. Как сами полосы, так и их движение практически не различимы невооруженным глазом на телевизионной записи, и только применение специфических методов обработки видеоизображения позволяют провести их анализ (рис.4).

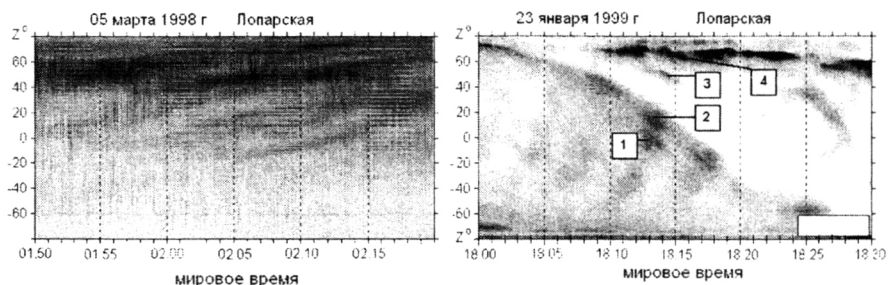


Рис.4. Примеры квазидуг в пульсирующем и диффузном свечении (слева направо)

Возможно, по этой причине они и оказались «вне поля зрения» исследователей и не получили теоретического объяснения. Пространственная периодичность и распространение полос в направлении, перпендикулярном их протяженности, указывает на волновой характер их источника в магнитосфере. Крайне невысокая скорость распространения ограничивает число возможных кандидатов рассмотренными в начале главы «внутренними гравитационными»

волнами. Правильность выбора подтверждает то, что эти волны способны усилить высыпания из-за наличия в них продольной компоненты

возмущенного магнитного поля, B_z , и распространяются в среде с плавным градиентом плазменного давления, коей в нашем случае является размытая внутренняя граница плазменного слоя, статистически сопряженная именно с областью пульсирующих и диффузных сияний. Получены количественные характеристики явления.

В пункте 4.5.4 обращается внимание на то, что в случае последовательности суббурь, когда перед началом следующей активизации небо еще занято пульсирующим или диффузным свечением, обеспечивающим визуализацию распространения «внутренних гравитационных» волн в магнитосфере, полосы видны непосредственно перед началом суббури. В этом случае их можно рассматривать как предвестник суббурь, запускаемых внешним волновым возмущением (рис.5а).

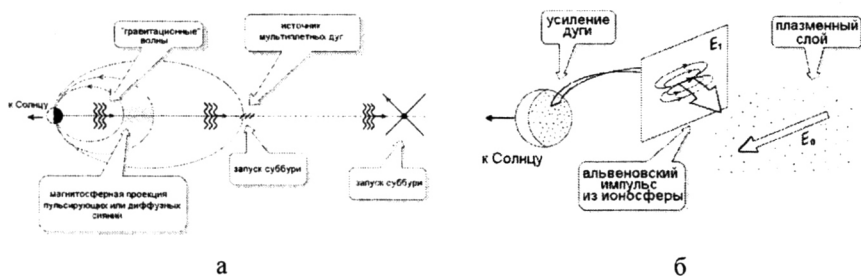


Рис.5. Прохождение «внутренних гравитационных» волн через различные участки магнитосферы (а); генерация электрического поля противоположного полю стационарной конвекции во время вспышки авроральной дуги в ионосфере (б)

Более типичным видом предсуббуревой активности являются вариации светимости в одиночной дуге или в системе дуг (авроральный псевдобрейкап по терминологии Акасофу). В последнем случае уярчение «перескакивает» с дуги на дугу так, как если бы источник, его вызывающий, двигался в магнитосфере в радиальном направлении от Земли в хвост. Это дает основания связать псевдобрейкапы с прохождением «внутренних гравитационных» волн через область генерации мультиплетных дуг. Показано (с использованием данных «три-статик» измерений электрического поля радаром EISCAT), что во время псевдобрейкапов азимутальная компонента электрического поля конвекции в окрестности предсуществующей дуги уменьшается за счет появления поля поляризации. Из-за высокой проводимости вдоль силовых

линий это добавочное поле будет передаваться в магнитосферу, где также может стимулировать развитие суббури (рис.5б).

Основная часть раздела 5 посвящена исследованию свойств ранее практически не изученного отклика геомагнитного поля в герцовом диапазоне на внезапное изменение динамического давления солнечного ветра и обсуждению конкретных способов использования этого вида пульсаций для волновой диагностики околоземной плазмы.

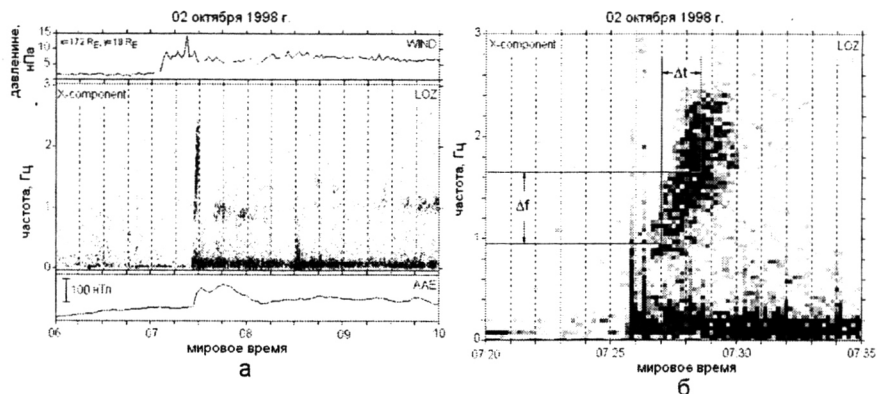


Рис. 6. Геомагнитные вариации в авральной зоне и на экваторе, вызванные SI (а); структура отклика в герцовом диапазоне в первые минуты после SI (б)

Отклик имеет достаточно сложную структуру в виде трех независимых друг от друга форм активности (рис.6). Сначала наблюдается кратковременный широкополосный всплеск в диапазоне 0.1-2 Гц. Спустя примерно минуту снова следует кратковременный широкополосный всплеск, но уже с ярко выраженной отсечкой по нижней частоте и дисперсией частоты во времени (рис.6б). Вместе с ним начинается серия из более длительных всплесков в диапазоне 0.1-3 Гц с периодом повторения 10-15 минут. Количество всплесков в серии может достигать 20. Эти формы отклика могут реализоваться либо все три одновременно, либо попарно (в любой комбинации), либо только один из них (также любой). Первая форма наблюдается одновременно с началом бухты риометрического поглощения, то есть напрямую связана со стимулированным SI высыпанием частиц в ионосферу. Предлагается использовать ее для наиболее точного определения момента удара неоднородности солнечного ветра по магнитопаузе. Обычно этот момент оценивается исходя из скорости распространения неоднородности в солнечном ветре. При этом возникает погрешность из-за трудно учитываемого характера распространения

возмущения через переходную область. Вторая форма отклика наиболее известна в литературе. Ее возбуждение, скорее всего, связано с прохождением фронта волны сжатия через область магнитосферы, где в это время имеются благоприятные условия для развития ионно-циклотронной неустойчивости. Всплеск имеет явное преимущество перед другими пульсациями герцового диапазона (например, типа «жемчужин») при использовании в диагностических целях, так как имеет отчетливое начало. С помощью второй формы отклика в работе производились оценки скорости распространения альвеновской волны в магнитосфере вдоль силовой линии геомагнитного поля и в ионосферном волноводе. О третьей форме отклика в литературе имеются лишь упоминания. Соискателем показано, что вероятность ее реализации связана с наличием горячих протонов в дневной магнитосфере, что подтверждает ранний постулат о том, что магнитосфера должна быть «подготовленной» к возбуждению пульсаций герцового диапазона. Отсутствие следов модулирующей волны в данных наземных магнитометров и длительность явления дают основание связать эту форму отклика с «внутренними гравитационными» волнами. Горячие протоны создают, с одной стороны, плавный градиент давления в дневной магнитосфере, нужный для реализации этих волн. С другой стороны, протонная добавка может создать специфическое распределение плотности плазмы вдоль силовой линии и волны отражаются, не доходя до ионосферы (то есть становятся невидимыми для наземного наблюдателя и слабо затухают). Волна также модулирует инкремент ионно-циклотронной неустойчивости из-за наличия в волне возмущенной

компоненты \tilde{B}_z . С резонансом этих волн может также быть связано противофазное поведение третьей формы отклика, иногда наблюдаемое на двух размещенных на значительном расстоянии друг от друга обсерваториях (Баренцбург и Ловозеро). Временной сдвиг колебаний столь велик, что не может быть объяснен ионосферным распространением (рис.8).

В подразделе 5.7 представлены экспериментальные подтверждения высказанной ранее гипотезе о том, что источником так называемого предварительного импульса SI в высоких широтах является возмущение ионосферной токовой системы, обусловленное стимулированными SI электронными выпадениями. Проведенные численные расчеты для конкретной ситуации, когда известны основные входные параметры – положение и форма неоднородности и вектор невозмущенного электрического поля в ионосфере, демонстрируют хорошее согласие теории с результатами магнитных измерений.

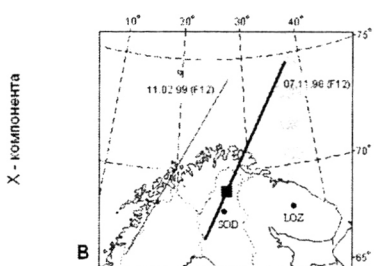
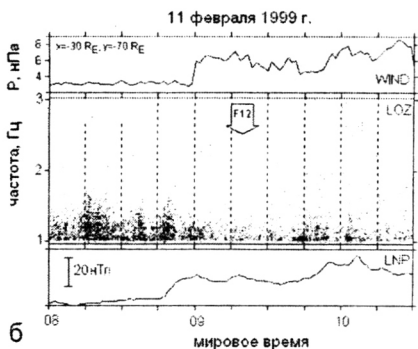
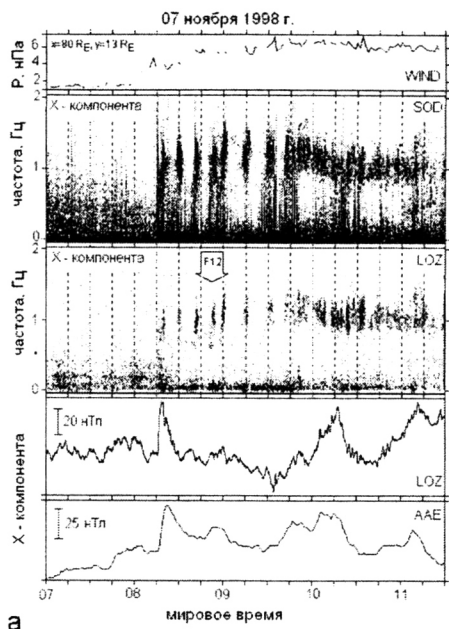


Рис. 7. Пример двух SI, один из которых сопровождается пульсациями (а), другой – нет (б). Стрелками отмечены моменты пролета спутников DMSP над Скандинавией. Фрагменты траекторий спутников, нанесённые на карту (в). Квадратом обозначено положение области высыпавшихся протонов.

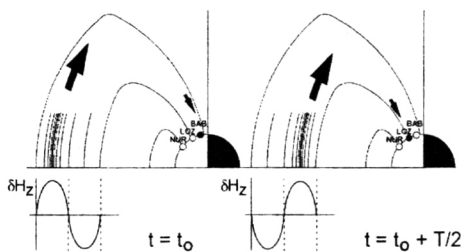
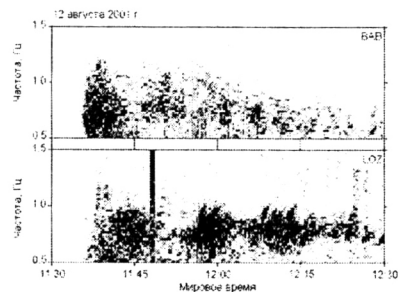


Рис. 8. Противофазный характер отклика на SI в obs. Баренцбург и obs. Ловозеро (а); структура модулирующей волны, поясняющая противофазность отклика (б)

В разделе 6 демонстрируется возможность мониторинга процессов на магнитопаузе (пересоединения) при помощи мультиинструментальных наблюдений на Шпицбергене. Привлекаются данные радаров EISCAT и SuperDARN, данные по высыпающим частицам спутников DMSP, данные сети магнитометров IMAGE, но акцент делается на оптическую аппаратуру и индукционные магнитометры, размещенные в obs. Баренцбург. Пересоединение является важным элементом космической погоды, обеспечивающим, в частности, перераспределение энергии и вещества в околоземном космическом пространстве. Во всех рассмотренных событиях типичная для дневных сияний форма активности в виде смещающихся к полюсу пространственно-периодических дискретных дуг (*poleward moving auroral forms*) наблюдается на замкнутых силовых линиях. Это означает, что каждая смещающаяся к полюсу отдельная дуга не может быть идентифицирована с пересоединяющейся силовой трубкой, как это утверждается в заметном числе работ по исследованиям сияний в области каспа. Направление меридионального движения системы дуг, контролируемое знаком B_z компоненты ММП, является следствием смещения или расширения внутримagnetосферного домена, в пределах которого расположен источник сияний. Такое поведение домена представляется связанным с пересоединением, но косвенным образом – либо через изменение размеров полярной шапки, обусловленное оттоком/притоком силовых линий в ходе пересоединения, либо за счет захвата «новой» плазмы из переходной области. Деформация полярной шапки – крупномасштабное явление, и судить о нем только по динамике сияний в локальной области было бы ошибкой. В работе предлагается дополнительно использовать для этих целей расстояние между фокусами вихрей конвекции, определяемое по данным глобальной радарной системы SuperDARN. Захват плазмы – мелкомасштабный и к тому же спорадический процесс, проследить который можно с использованием аппаратуры с относительно небольшим полем зрения – all-sky камера и радары CUTLASS. В подразделе 6.3 наглядно показано, что и в этом случае можно допустить ошибку, если ограничиться одним видом наблюдений, а при интерпретации вместо дополнительных измерений привлекать информацию, полученную ранее другими исследователями, в том числе и статистические данные. Пример успешного применения мультиинструментального подхода приводится в подразделе 6.4.

Рассмотрено несколько случаев существенного сдвига границы полярной шапки к югу, так что obs. Баренцбург находилась в области открытых силовых линий. Данные индукционного магнитометра в Баренцбурге дополнялись аналогичными данными, полученными на материковых обсерваториях, а также данными радарных систем SuperDARN и CUTLASS и данными спутников DMSP.

Показано, что наблюдаемые здесь в это время пульсации Pc1 могут быть связаны с дрейфующими через шапку пересоединившимися силовыми трубками. Сформулированы условия, при которых дневные Pc1 в Баренцбурге могут служить индикатором пересоединения.

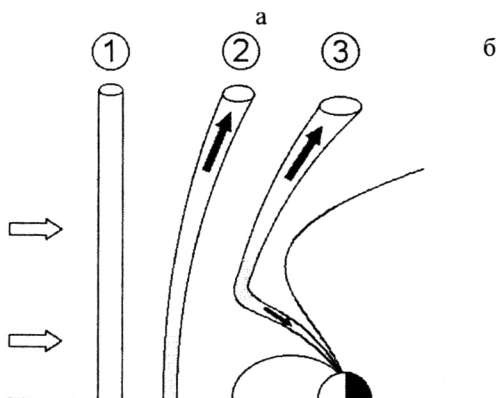
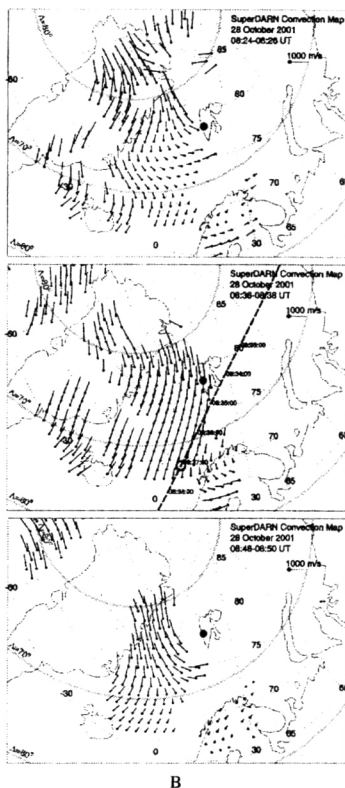
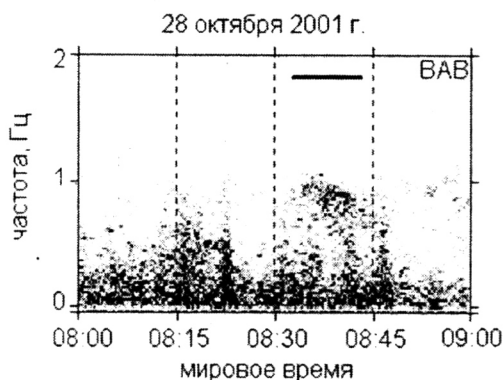


Рис.9. Пульсации в Баренцбурге (а); проникновение волновой активности из переходной области в полярную ионосферу (б); изменение характера конвекции: в момент регистрации пульсаций пересоединившиеся трубки дрейфуют над Шпицбергом (в)

В заключении (раздел 7) приводятся основные результаты исследований, в расширенном виде сформулированы положения, выносимые на защиту, даются рекомендации по поиску предвестников суббури в полярных сияниях. Отмечено, что

в основу работы легли данные регулярных (обсерваторских) наблюдений ПГИ на Кольском полуострове и на Шпицбергене. Даются формальные сведения о публикационной активности автора.

III. Основные результаты

1. Проанализирована форма авроральной активности, которая ранее в литературе не упоминалась. Сияния имеют вид системы из 2-3 полос, светимость в которых лишь ненамного превышает светимость фона (диффузного или пульсирующего). По этой причине, а также из-за медленного изменения положения в пространстве обнаружение структур невооруженным глазом затруднено, и проанализировать их динамику стало возможно благодаря применению телевизионной регистрирующей аппаратуры и специальным методам обработки. Полосы по форме напоминают дуги сияний, смещаются к полюсу со скоростью ~ 250 м/с на уровне ионосферы и исчезают, достигнув полюсной границы области фонового свечения. Примечательно, что в пульсирующем фоне полосы также представляют пульсирующие образования. Время жизни такой квазидуги составляет 5-7 минут. Проанализировано несколько суббурь, начинающихся на фоне сияний, оставшихся после предшествующих брейкапов. Показано, что в ряде случаев перед началом таких суббурь наблюдается медленно дрейфующая к полюсу система из 3-4 полос повышенной светимости (квазидуг). В рамках предложенной ранее гипотезы о триггировании суббури распространяющимися через плазменный слой магнитозвуковыми волнами система квазидуг в пульсирующем или диффузном фоне может трактоваться как предвестник очередной суббури.

Авроральные структуры связываются со специфическими МГД-волнами, распространяющимися в области размытой внутренней границы плазменного слоя и модулирующими фоновое свечение.

2. Проведен анализ ранее практически не исследованного типа пульсаций герцового диапазона, возникающих как отклик на внезапное изменение динамического давления солнечного ветра. На сонограммах пульсации имеют форму серии короткоживущих всплесков с характерной частотой около 1 Гц и периодом следования 10-15 минут (пульсации Ps1). Показано, что в статистике пульсации сопровождают лишь каждый пятый скачок давления и наблюдаются преимущественно в околополуденные часы. Связь вероятности возбуждения пульсаций с величиной внезапного импульса не очевидна, зато обнаружена тесная корреляция случаев наблюдения Ps1 с появлением в данных спутников DMSP высыпающихся горячих протонов (энергия >10 кэВ). Предполагается, что протоны были инжектированы в дневную магнитосферу в ходе развития магнитной бури, так как случаи наблюдения пульсаций Ps1 после SI приходятся на конец восстановительной

фазы магнитных бурь. Если протонов нет, сжатие магнитосферы не сопровождается генерацией Psil . Предложена физическая модель явления, в которой наличие протонов в дневной магнитосфере создает благоприятные условия как для развития ионно-циклотронной неустойчивости, ответственной за генерацию Psil , так и для возбуждения длиннопериодной модулирующей волны компрессионного типа.

3. Проведен многосторонний анализ случаев сжатия магнитосферы при быстром увеличении давления солнечного ветра. Показано, что усиление риометрического поглощения происходит одновременно с началом положительной или отрицательной вариации H -компоненты магнитного поля в авроральной области и широкополосным всплеском активности в диапазоне выше 0.1 Гц. Вариация начиналась на 1-2 минуты раньше увеличения H -компоненты поля в виде ступени на экваториальных станциях и напоминала так называемый предварительный импульс SC. В ряде случаев также имели место выпадения менее энергичных частиц, вызывающие электронные сияния. Предложена «ионосферная» модель геомагнитных возмущений, стимулированных внезапными импульсами. Роль источника как предварительного импульса, так и альвеновских колебаний диапазона Pc5 играет локальное увеличение ионосферной проводимости. В предложенных ранее моделях трансформация магнитозвуковой моды в альвеновскую происходит на неоднородностях магнитосферной плазмы, а появление предварительного импульса связывается с различным характером распространения фронта возмущения в направлениях вдоль и поперек геомагнитных силовых линий.

4. Исследована связь дневных пульсаций герцового диапазона, наблюдаемых в высоких широтах при южном ММП, с изменением характера ионосферной конвекции. Рассмотрены ситуации, когда B_z компонента отрицательная и очень большая по модулю, так что в околополуденные часы Шпицберген определенно находится в полярной шапке, что в ряде случаев подтверждается данными DMSP. Пульсации появляются на самой высокоширотной станции тогда, когда над ней проходят основания только что пересоединившихся силовых трубок, дрейфующих от каспа на ночную сторону. Источник пульсаций связывается с анизотропной плазмой переходной области. В этом случае данные цепочки индукционных магнитометров могут использоваться для мониторинга пересоединения при южном ММП. На возможную связь пульсаций с пересоединением указывает также тот факт, что они начинаются тогда, когда B_y компонента ММП мала, то есть силовые линии межпланетного и земного магнитных полей антипараллельны.

5. По данным сети индукционных магнитометров на Кольском и Скандинавском полуострове и на архипелаге Шпицберген оценена скорость

ионосферного распространения пульсаций герцового диапазона, возбуждаемых внезапным увеличением динамического давления солнечного ветра. Минимальная величина скорости составила 80 км/с, что заметно меньше величин, полученных ранее. Причина наблюдаемого расхождения кроется в использовании другими авторами пульсаций типа «жемчужин», положение источника которых в магнитосфере не определено, размеры достаточно велики и в проекции на ионосферу могут быть сравнимы с расстоянием между пунктами приема.

6. Предложен метод, позволяющий по наземным магнитным (в диапазоне Pc1) и риометрическим данным оценить время движения альвеновской волны от экваториальной плоскости магнитосферы к ионосфере. Распространяющаяся через дневную магнитосферу магнитозвуковая волна вызывает сжатие магнитных силовых трубок. Сжатие экваториального участка трубки приводит одновременно и к генерации ионно-циклотронных волн, и к рассеянию электронов в конус потерь возбуждаемыми электронно-циклотронными волнами. Вдоль силовой линии ионно-циклотронные волны попадают на Землю, где регистрируются в виде кратковременного всплеска геомагнитной активности в герцовом диапазоне. Сброс электронов в ионосферу сопровождается изменением проводимости, что может быть зафиксировано риометром. Скорость частиц велика по сравнению со скоростью волны, поэтому временем их распространения можно пренебречь и рассматривать запаздывание герцового всплеска относительно начала бухты в риометрическом поглощении как время распространения волны от источника генерации к приемнику. На основе метода произведены оценки собственных колебаний магнитной силовой линии и скорости альвеновской волны.

7. Исследовано движение высокоширотных дуг вдоль себя. В предполуденном секторе дуги распространяются с востока на запад, в послеполуденном – с запада на восток, что соответствует движению дуг от области активных сияний. Дуги движутся вдоль линий конвекции со скоростью 2-4 км/с, что в несколько раз превышает скорость конвекции в окрестности дуги. Предложена возможная интерпретация в рамках модифицированной желобковой неустойчивости, вызывающей расслоение магнитосферной конвекции.

8. Проанализированы результаты координированных оптических и радарных наблюдений необычного для высоких широт и поздних утренних часов аврорального явления – омега-сияний и факельной структуры. Показано следующее:

- суббуревой активности не достаточно для генерации дневных омега-сияний. Дополнительным фактором, формирующим в дневной магнитосфере

условия для их появления, являются положительные вариации B_z компоненты ММП;

- источник омега-сияний не совпадает с границей обращения конвекции, что делает неустойчивость Кельвина–Гельмгольца маловероятной причиной их генерации;

- координированные оптические и радарные измерения свидетельствуют в пользу механизма формирования аврорального факела вследствие развития перестановочной неустойчивости;

- получены численные характеристики динамики аврорального факела. Факел двигался на восток со скоростью ~ 600 м/с, что соответствует скорости конвекции плазмы на расстоянии 400 км от района наблюдений. Внутри факела плазма двигалась к северу со скоростью 100 – 200 м/с. За пределами факела, около его западного края, плазма дрейфовала во встречном направлении, то есть на юг, со скоростью ~ 300 м/с. Данные величины представляют меридиональную компоненту конвекции (вдоль луча радара);

- в дальнейших исследованиях омега-сияний следует обратить особое внимание на кратковременную активизацию ограниченной в азимутальном направлении авроральной дуги и появление темной «дыры» в фоновом свечении, поскольку это могут быть предвестники развития факела.

9. Проанализирован характер изменения ионосферного электрического поля при прохождении нескольких авроральных дуг через область радарных измерений. В одном случае проводимость плазмы и нормальная компонента электрического поля в дуге увеличились по сравнению с их невозмущенными значениями. В другом случае поле и проводимость изменились «традиционным» образом (в противофазе). Измерения в окрестностях «коррелирующих» дуг проводились в момент их генерации, а «традиционная» дуга представляла собой сформировавшееся образование. В возникающей дуге величина электрического поля может определяться не только проводимостью ионосферной плазмы, но и процессами в магнитосферно-ионосферной системе, приводящими к его усилению. В качестве возможной причины усиления конвекции внутри дуги называется модифицированная желобковая неустойчивость.

10. Проанализирована реакция дневных сияний на смену знака B_z компоненты ММП. Для того чтобы исключить прямую связь авроральных структур с пересоединяющимися силовыми линиями, наблюдения проводились вдали от полуденного меридиана. В целом результаты подтверждают выводы ранних исследований В.Г. Воробьева (Vorobjev et al., 1976) и С.В. Леонтьева (Leontyev et al., 1992), когда наблюдения проводились с более низким временным разрешением, а методы обработки были менее совершенны. Показано, что авроральная активность в послеполуденные часы имеет вид

poleward moving auroral forms. Формы находятся в пределах пограничного плазменного слоя (в работе С.В. Леонтьева (Leontyev et al., 1992) – внутри аврорального овала). Каждая дуга, формирующая PMAF, движется к полюсу независимо от знака вертикальной компоненты ММП. Знаком этой компоненты контролируется движение сияний в целом (то есть движение *bps*) к экватору или полюсу. Смещение *bps* связывается с изменением размеров полярной шапки. Надежная корреляция динамики сияний в целом с вариациями B_z компоненты ММП может использоваться в ситуациях, когда данные по ММП отсутствуют или допускают неоднозначную интерпретацию из-за неточности определения момента подхода неоднородности к магнитопаузе. В продолжение исследований представлены конкретные примеры, которые указывают на перспективность использования комбинации оптических и радарных наблюдений в этом временном секторе для прогноза геомагнитной активности на ночной стороне. Произведен критический анализ существующих теорий послеполюденных дуг.

IV. Благодарности

Автору посчастливилось сотрудничать с блестящими физиками-теоретиками Ю.П. Мальцевым и В.Б. Ляцким (ПГИ), учеником которых он себя считает. Автор признателен талантливым коллегам и прекрасным друзьям А. Козловскому (Университет г. Оулу, Финляндия) и Т. Сергиенко (Шведский институт космической физики, Швеция), в соавторстве с которыми выполнена заметная часть работ, составивших диссертацию. Первые индукционные магнитометры были сконструированы и установлены в обсерваториях ПГИ инженерной группой, возглавляемой А.Н. Васильевым. Большая техническая работа по переводу телевизионных записей полярных сияний в цифровой формат была проделана В. Ариным (Арзамас-16) и Олегом Корниловым-младшим (СПбГУ). В оригинальных работах автора широко использовались данные обс. Баренцбург (арх. Шпицберген). Проведение наблюдений в суровых условиях Арктики требует больших человеческих усилий и самоотверженности. Автор благодарит сотрудников ПГИ, чья профессиональная деятельность способствовала развитию обсерватории и получению данных высокого качества. Автор благодарен В.А. Сергееву и В.С. Семенову (СПбГУ) за первое прочтение рукописи и критические замечания.

V. Публикации по теме диссертации

1. Сафаргалеев В.В., Мальцев Ю.П. Внутренние "гравитационные" волны в плазменном слое // *Геомагн. аэрономия.* – 1986. – Т.26. – С.270.
2. Сафаргалеев В., Мальцев Ю. Генерация предварительного импульса и долгопериодных пульсаций во время SI // *Геомагн. аэрономия.* – 1987. – Т.27. – С.247.
3. Ляцкий В.Б., Сафаргалеев В.В. О генерации пульсаций в диапазоне Pc1 в области каспа // *Геомагн. аэрономия.* – 1989. – Т.29. – С.665.
4. Ляцкий В.Б., Сафаргалеев В.В. Желобковая неустойчивость магнитопаузы при наличии магнитного барьера // *Геомагн. аэрономия.* – 1991. – Т.31. – С.354.
5. Сафаргалеев В.В., Ляцкий В.Б. Возможность возбуждения суббури внезапным импульсом // *Геомагн. аэрономия.* – 1993. – Т.33. – С.139.
6. Сафаргалеев В.В., Ляцкий В.Б., Смит П., Кривилев В.Н., Гейзи Н., Маннинен Ю., Кауристи К., Турунен Т., Козловский А.Е. Вариации азимутальной компоненты ионосферного электрического поля до и во время аврорального брейкпада // *Геомагн. аэрономия.* – 2000. – Т.40, № 2. – С.39.
7. Сафаргалеев В.В., Осипенко С.В., Васильев А.Н. Пространственно-периодические дугообразные формы в области пульсирующих сияний // *Геомагн. аэрономия.* – 2000. – Т.40, № 6. – С.38.
8. Сафаргалеев В.В., Осипенко С. Предвестники магнитосферной суббури в пульсирующих и диффузных сияниях // *Геомагн. аэрономия.* – 2001. – Т.41, № 6. – С.791.
9. Сафаргалеев В.В., Васильев А.Н., Пчелкина Е.В., Серебрянская А.В. Геомагнитные пульсации диапазона 0.1-5 Гц, индуцируемые импульсом динамического давления солнечного ветра // *Геомагн. аэрономия.* – 2003(а). – Т.43, № 4. – С.482.
10. Сафаргалеев В.В., Пчелкина Е.В., Васильев А.Н. Оценка времени распространения альвеновской волны по наземным магнитным и риометрическим данным // *Геомагн. аэрономия.* – 2003(б). – Т.43, № 3. – С.344.
11. Сафаргалеев В.В., Пчелкина Е.В., Кудряшова Н.В., Воронин А.И., Козловский А.Е. Оценка скорости распространения волн диапазона 0.2-5 Гц в ионосферном волноводе // *Геомагн. аэрономия.* – 2004. – Т.44, № 5. – С.607.
12. Сафаргалеев В.В., Тагиров В.Р., Осипенко С.В., Кудряшова Н.В. Отклик послеполуночных полярных сияний на изменения Vz компоненты ММП // *Геомагн. аэрономия.* – 2004. – Т.44. – С.345.

13. Козловский А.Е., Нильссон Х., Сафаргалиев В.В. Комплексное исследование динамики авроральных дуг и конвекции ионосферной плазмы в предполуденные часы // *Геомагн. астрономия*. – 2006. – Т.46. – С.501.
14. Сафаргалиев В.В., Сергиенко Т.И., Козловский А.Е., Сандал И., Брандстрем У., Шибаява Д.Н. Случай усиления электрического поля в авроральной дуге по данным одновременных радарных (EISCAT) и оптических (ALIS) наблюдений // *Геомагн. астрономия*. – 2009. – Т.49. – С.371.
15. Сафаргалиев В.В., Терещенко Е.Д. Состояние и перспективы геофизических исследований на архипелаге Шпицберген // *Успехи физ. наук*. – 2010. – Т.180, № 5. – С.535 (doi:10.3367/UFNr.0180.20105i.0535).
16. Kozlovsky A.E., Safargaleev V.V., Lyatsky W.B. The transformation of magnetoacoustic waves into Alfvén waves inside the magnetosphere // *Ann. Geophys.* – 1994. – Vol.12. – P.1022.
17. Safargaleev V.V., Lyatsky W.B. Guided waves in the plasma sheet and triggering of a substorm // *Ann. Geophys.* – 1994. – Vol.12. – P.1018.
18. Rezhnev B.V., Safargaleev V.V., Lyatsky W.B. On the formation of a plasma pressure anisotropy in the dayside magnetosheath // *Ann. Geophys.* – 1995. – Vol.13. – P.237.
19. Safargaleev V., Lyatsky W., Tagirov V. Luminosity variations in several parallel auroral arcs before auroral breakup // *Ann. Geophys.* – 1997. – Vol.15. – P.959.
20. Safargaleev V., Lyatsky W., Gazey N., Smith P., Kriviliov V. The response of the azimuthal component of ionospheric electric field to auroral arc brightening // *Ann. Geophys.* – 2000. – Vol.18. – P.65.
21. Safargaleev V.V., Osipenko S.V. Multiple arc-like forms in pulsating and diffuse auroras: ionospheric trace of a substorm trigger? // *Adv. Space Res.* – 2001. – Vol.28. – P.1617.
22. Safargaleev V., Kangas J., Kozlovsky A., Vasilyev A. Burst of ULF noise excited by sudden changes of solar wind dynamic pressure // *Ann. Geophys.* – 2002. – Vol.20, N.11. – P.1751-1761.
23. Safargaleev V.V., Osipenko S.V., Kozlovsky A.E., Tagirov V.R. Azimuthal expansion of high latitude auroral arcs // *Ann. Geophys.* – 2003. – Vol.21. – P.1793.
24. Kozlovsky A., Safargaleev V., Jussila J., Koustov A. Pre-noon high latitude auroral arcs as a manifestation of the interchange instability // *Ann. Geophys.* – 2003. – Vol.21. – P.2003.

25. **Safargaleev V.V.**, Serebryanskaya A.V., Koustov A.V., Lester, M., Pchelkina E.V., Vasilyev A.N. A possible origin of dayside Pc1 magnetic pulsations observed at high latitudes // *Ann. Geophys.* – 2004. – Vol.22. – P.2997.
26. **Safargaleev V.V.**, Sergienko T.I., Nilsson H., Kozlovsky A., Massetti S., Osipenko S., Kotikov A. Combined optical, EISCAT and magnetic observations of the omega bands/ps6 pulsations and an auroral torch in the late morning hours: a case study // *Ann. Geophys.* – 2005. – Vol.23. – P.1821.
27. Kozlovsky A., **Safargaleev V.**, Ostgaard N., Koustov A., Jussila J., Roldugin A. On the motion of dayside auroras caused by a solar wind pressure pulse // *Ann. Geophys.* – 2005. – Vol.23. – P.509.
28. **Safargaleev V.**, Kozlovsky A., Sergienko T., Yeoman T.K., Uspensky M., Wright D.M., Nilsson H., Turunen T., Kotikov A. Optical, radar and magnetic observations magnetosheath plasma capture during a positive IMF Bz impulse // *Ann. Geophys.* – 2008. – Vol.26, N.3. – P.517.
29. **Safargaleev V.**, Kozlovsky A., Honary F., Voronin A., Turunen T. Geomagnetic disturbances on ground associated with particle precipitation during SC // *Ann. Geophys.* – 2010. – Vol.28, N.1. – P.247.
30. **Safargaleev V. V.**, Shibaeva D. N., Sergienko T. I., Kornilov I. A. On the possibility of coupling satellite and ground-based optical measurements in the region of pulsating auroras // *Geomagn. Aeronomy.* – 2010. – Vol.50, N.7.– P.873.

Автореферат

САФАРГАЛЕЕВ Владимир Ваисович

**ВОЗМУЩЕНИЯ МАГНИТОСФЕРНО-ИОНОСФЕРНОЙ
СИСТЕМЫ В АРКТИЧЕСКИХ ШИРОТАХ И ЗАДАЧИ
МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ**

Технический редактор В.И.Бондаренко

Лицензия ПД 00801 от 06 октября 2000 г.

Подписано к печати 29.06.2011

Формат бумаги 60x84 1/16

Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Times/Cyrillic

Усл. печ. л. 1.75. Заказ № 25. Тираж 100 экз.

Российская Академия Наук

Ордена Ленина Кольский научный центр им.С.М.Кирова
184209, г.Апатиты, Мурманская область, ул.Ферсмана, 14

